

НАГРУЗОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.Г. Юдинцев, О.В. Бубнов, Ю.Н. Дементьев

Томский политехнический университет

E-mail: antpoly@mail.ru

Представлен краткий обзор состояния современных систем электропитания космических аппаратов с позиции энергообеспечения и надежности. Рассмотрены способы создания испытательных нагрузочных комплексов для систем электропитания. Показаны принцип работы и характеристики разработанного блока имитации нагрузки БИН-40.

Система электропитания (СЭП) является одной из важнейших систем космического аппарата (КА). При ее отказе беспилотный КА прекращает активное существование, т.к. электроэнергия, которую вырабатывает СЭП, идет на питание системы управления движением КА, автоматики и маршевой двигательной установки, двигателей ориентации и стабилизации КА, систем радиосвязи, терморегулирования, телеметрической системы и т.д. На современных КА системы энергообеспечения, распределения электроэнергии, системы обеспечения заданного качества, аккумуляирования с учетом более высокой надежности по сравнению с другими системами занимают по массе, объему стоимости до 30 % самого КА. Поэтому проблема создания СЭП КА имеет первостепенное значение, ее разрешение заметно улучшает технико-экономические показатели КА в целом [1, 2].

Требования к сроку работы и надежности беспилотного КА на орбите увеличиваются с каждым годом. По последним данным [3], срок пребывания на орбите должен достигать 10–12 лет, при этом СЭП должна обладать наибольшей степенью надежности. Решение проблемы массогабаритной оптимизации путем выхода на более высокие частоты преобразования с применением современных полупроводниковых материалов накладывает дополнительный ряд требований при проектировании и испытании.

В состав современной СЭП КА как правило входят: солнечная и аккумуляторная батареи, комплекс автоматики и стабилизации в составе: зарядно-разрядный модуль, стабилизатор напряжения, устройства контроля и автоматики. Среднесуточная мощность систем электропитания КА сегодня составляет 4...7 кВт [3, 4], при этом характер нагрузки может быть активным, реактивным, смешанным и т.д.

Заключительным и самым важным этапом создания СЭП являются наземные испытания. Очевидно, что подключение реальных устройств – солнечных батарей, аккумуляторных батарей, бортовой полезной нагрузки при проведении испытаний невозможно. Данная проблема решается выполнением специализированных под конкретную СЭП КА имитаторов солнечных и аккумуляторных батарей, а также нагрузочных устройств (НУ). НУ является испытательным комплексом, содержащим различные виды нагрузок: постоянная (активная) нагрузка, импульсная (или скачкообразная), комплексная (активно-емкостная),

переменная с синусоидальной формой тока. Следует отметить, согласно перечисленным видам, НУ должно обеспечивать статические и динамические режимы – плавное нарастание и сброс-наброс нагрузочных токов. Рассмотрим упрощенные схемы нагрузок, необходимых для программы испытаний СЭП КА.

Наиболее простой является постоянная нагрузка, содержащая независимые ступени с активными сопротивлениями (рис. 1). Подключение и отключение ступеней обеспечивается автономно или дистанционно системой управления СУ (от внешней ЭВМ). Комплексная нагрузка (рис. 2) обеспечивает синхронное параллельное подключение постоянного активного сопротивления и последовательной RC-цепи к выходной шине СЭП.

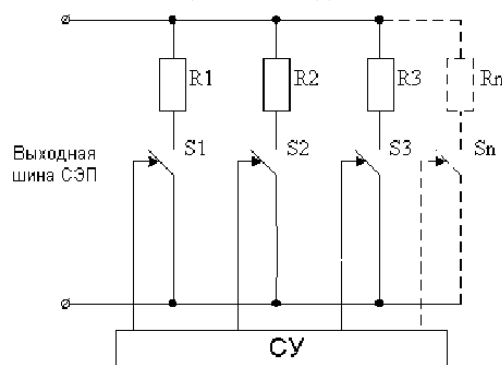


Рис. 1. Упрощенная схема имитации постоянной активной нагрузки

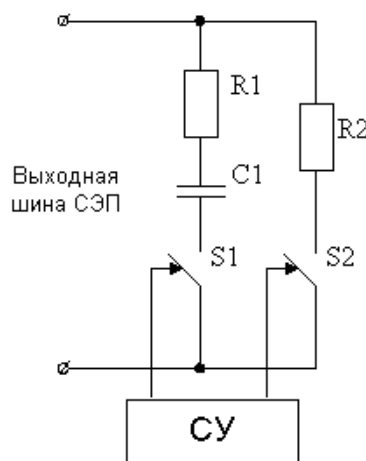


Рис. 2. Упрощенная схема имитации комплексной нагрузки

Переменная нагрузка создается путем протекания синусоидального тока по выходным шинам СЭП (рис. 3). При этом ток должен изменяться в диапазоне частот 10 Гц...150 кГц с плавно регулируемой амплитудой, что позволяет проверить нагрузочную способность в нескольких декадах, а также измерить выходной импеданс бортового источника питания. Функция нагрузочного тока в общем случае имеет вид, представленный рядом Фурье

$$i(t) = A_1 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)), \quad (1)$$

где A_1 – постоянная составляющая, a_n , b_n – амплитудные значения токов, ω – круговая частота.

В частности, особый интерес представляет функция вида

$$i(t) = A_i + I_m \sin(\omega t), \quad (2)$$

где I_m – амплитуда тока.

Функция (2) является идеальным представлением нагрузочного тока; на практике приходится сталкиваться с различными видами нелинейности, работой в условиях сильных электромагнитных и кондуктивных помех, поэтому функция (1) наиболее полно отражает вид гармонической нагрузки. Основная задача, при формировании синусоидальной нагрузки – приблизить функцию $i(t)$ к виду (2).

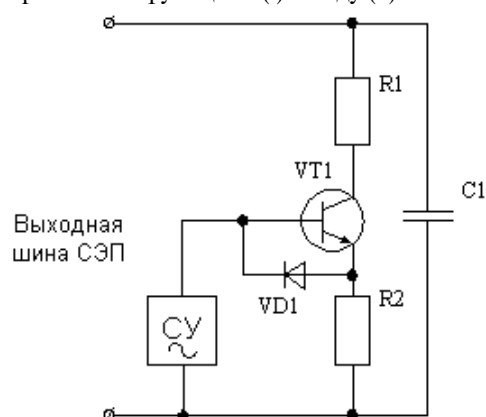


Рис. 3. Упрощенная схема имитации синусоидальной нагрузки

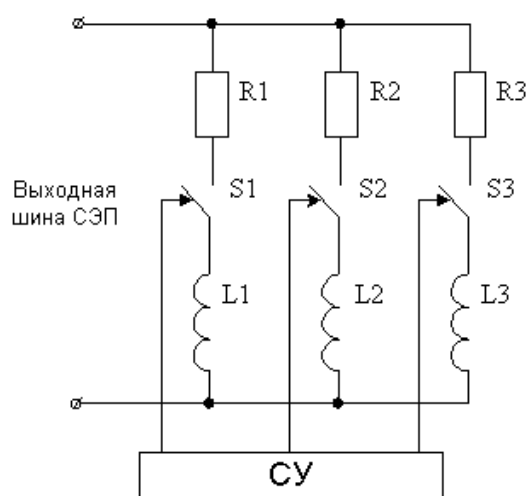


Рис. 4. Упрощенная схема имитации импульсной нагрузки

Канал импульсной нагрузки (рис. 4) обеспечивает независимое увеличение (наброс) или уменьшение (сброс) постоянной нагрузки (до $I_n = 90$ А) с коммутационной длительностью подключения или отключения менее 1 мкс. Длительность фронта наброса или сброса тока нагрузки определяется в процессе работы и зависит от индуктивности подводящих проводов и величины тока наброса или сброса.

Суммарный ток выходной шины СЭП КА, который задается указанными видами нагрузок, может достигать 150 А, при проведении испытаний современных моделей бортовых систем. Таким образом, при выходном напряжении СЭП $U_{\text{вых}} = 27 \text{ В}$, $I_{\text{вых}} = 75 \text{ А}$ рассеиваемая мощность составит 2025 Вт; при $U_{\text{вых}} = 40 \text{ В}$, $I_{\text{вых}} = 145 \text{ А}$ – 6 кВт. Следует отметить тенденцию увеличения выходного напряжения СЭП, что ведет к уменьшению массогабаритных показателей и полетного веса. Очевидно, что простое использование (при прямом включении) указанных нагрузок весьма нерационально. Одним из возможных решений данной задачи является преобразование энергии постоянного тока входного источника (СЭП КА) в энергию переменного тока и передачи ее в питающую сеть (рис. 5).

Выходное напряжение СЭП (рис. 5) через входной фильтр $\Phi_{вх}$ поступает на повышающий преобразователь ПП, далее высокое постоянное напряжение через дроссели $\Phi_{вых}$ поступает на вход ведомого сетью инвертора ВИ, где преобразуется и возвращается в питающую сеть. Такое построение позволяет вторично использовать основную часть энергии входного источника, а не рассеивать ее в пространстве. По этому каналу прокачивается энергия имитации постоянной (активной) нагрузки, а также постоянные составляющие импульсной и комплексной нагрузок.

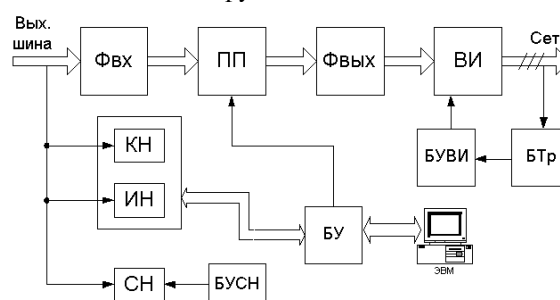


Рис. 5. Блок-схема комплекса имитации нагрузок. Фвх – фильтр входной; ПП – повышающий преобразователь; Фвых – фильтр выходной; ВИ – ведомый инвертор; БУВИ – блок управления ведомым инвертором; БТр – блок трансформаторов, необходимый для питания собственных нужд; БУ – блок управления; ЭВМ – локальная рабочая станция; СН – синусоидальная нагрузка; КН – комплексная нагрузка; ИН – импульсная нагрузка; БУСН – блок управления синусоидальной нагрузкой

Задачей импульсной нагрузки, которую реализует блок ИН совместно с вышеуказанным каналом постоянной нагрузки, является наброс или сброс тока нагрузки на фиксированную величину. При этом наброс тока по автономной или дистанционной ко-

манде (от внешней ЭВМ) выполняется включенным параллельно входу Фвх, дифференцирующим импульсным ключом с фиксированной заданной нагрузкой. По этой же команде через БУ повышающим преобразователем ПП, стабилизирующим и регулирующим входной ток нагрузочного устройства, задается дополнительная уставка по постоянному току, равная величине тока наброса. Форма импульса тока наброса дифференцирующего ключа характеризуется крутым передним фронтом и пилообразным спадающим задним фронтом, длительность которого превышает постоянную времени входного регулятора постоянного тока (рис. 6, а). Отрицательная обратная связь по току позволяет входному регулятору постоянного тока после крутого фронта наброса удерживать ток постоянным и равным заданной сумме величине постоянной нагрузки и скачка тока наброса.

По команде "Сброс", наоборот, следует предварительное плавное пилообразное отпирание дифференцирующего ключа до величины фиксированного тока (рис. 6, б). При неизменной уставке входного регулятора он вынужден поддерживать постоянным входной ток НУ, уменьшая входной ток преобразователей ПП пропорционально увеличению тока ключа. К моменту полного отпирания ключа входной ток преобразователя уменьшается на величину тока ключа. Затем следует резкое закрывание ключа и одновременно уменьшение уставки регулятора на величину сброса тока НУ. В этот момент баланс уставки регулятора и входного тока преобразователя, равный суммарному току НУ, позволяет удерживать систему в устойчивом состоянии и четко осуществить требуемый переход.

Включение постоянной составляющей комплексной нагрузки осуществляется аналогично набросу тока импульсной нагрузки и реализуется блоком КН совместно с каналом постоянной нагрузки.

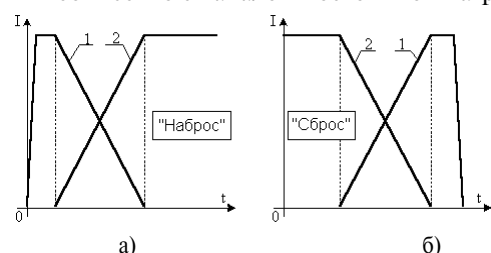


Рис. 6. Диаграммы: а) наброса нагрузки; б) сброса нагрузки. 1) ток в дифференцирующем ключе; 2) ток повышающего преобразователя

Нагрузку входного источника синусоидальным током осуществляет блок СН, управляемый БУСН. При этом энергия рассеивается в пространство, т.к. не представляется возможным преобразование синусоидальной формы тока во всем необходимом диапазоне (10 Гц...150 кГц). Этот недостаток не столь существен, т.к., к примеру, для шины 27 В необходимо имитировать ток с амплитудным значением $I_m = 10$ А, для шины 40 В – $I_m = 20$ А.

Блок ВИ представляет собой трехфазный мостовой инвертор, ведомый сетью. Упрощенная схема представлена на рис. 7 [5].

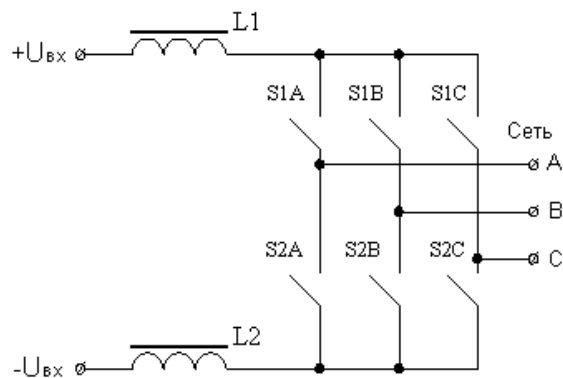


Рис. 7. Принципиальная схема ВИ

Управление ВИ осуществляется от БУВИ с постоянными углами инвертирования. С целью реализации питания и синхронизации БУВИ с сетью используется блок трансформаторов БТр. В качестве силовых ключей могут быть использованы тиристорные либо транзисторные модули IGBT, при этом будут различными алгоритмы управления ВИ, потери мощности в ключах и т.д. Вопросы схемной реализации ВИ и его анализ будут рассмотрены в последующих работах.

На базе представленной системы (рис. 5) разработан нагрузочный комплекс для шины питания 40 В "Блок имитации нагрузки БИН-40", структурная схема представлена на рис. 8.

Питание БИН-40 осуществляется от четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью трехфазного переменного тока напряжением 380/220 В, частотой 50 Гц. БИН-40 обеспечивает следующие каналы нагрузок:

- постоянная нагрузка (ПН) с независимыми ступенями 1, 2, 10, 10, 10, 10, 30, 30, 30 А; плавно изменяющаяся регулируемая постоянная нагрузка (РН) с диапазоном регулирования от 0 до 12 А, дискретность регулирования 0,1 А "грубо" и 0,01 А "точно";
- импульсная (скачкообразная) нагрузка (ИН) – независимое увеличение (наброс) или уменьшение (сброс) постоянной нагрузки на 12,5 А (500 Вт), 25 А (1000 Вт), 40 А (1600 Вт), 90 А (3600 Вт) с коммутационной длительностью подключения или отключения менее 1 мкс;
- комплексная нагрузка (КН) синхронное параллельное подключение к шине 40 В постоянного активного сопротивления: а) 4,57 Ом и последовательной RC-цепи с величиной сопротивления 0,56 Ом и емкостью 13000 мкФ; б) 1 Ом и последовательной RC-цепи 0,5 Ом, 43 мкФ;
- переменная синусоидальная нагрузка – плавное увеличение или уменьшение размаха синусоидального тока нагрузки в диапазоне от 1 до 20 А, дискретность изменения тока 0,1 А. Частотный диапазон 20 Гц...100 кГц, управление частотой СН осуществляется от внутреннего генератора синусоидального сигнала, организованного на базе процессора с RISC-архитектурой.

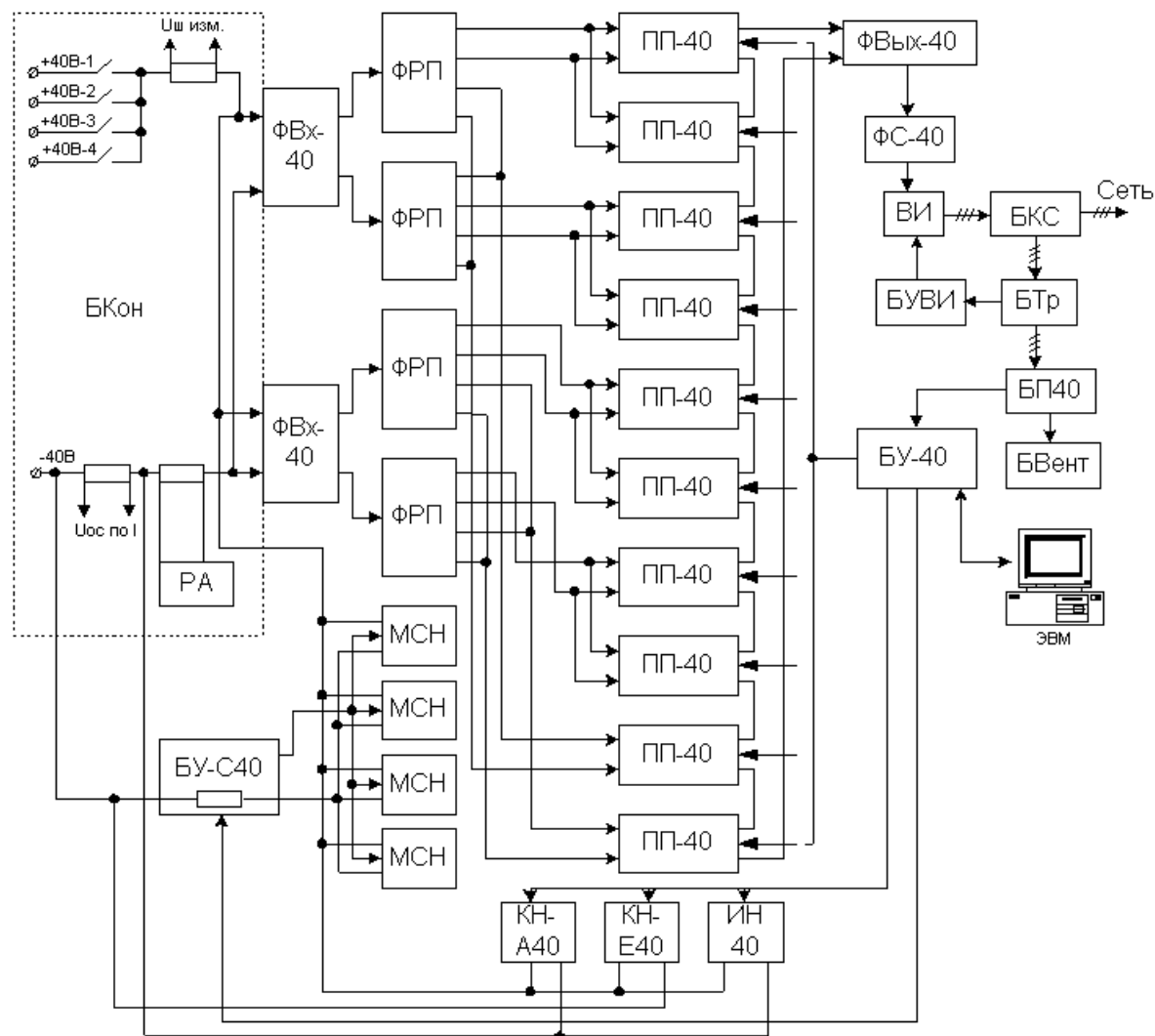


Рис. 8. Структурная схема БИН-40. Бкон — блок контакторов; ФВх-40 — фильтр входной; БУ-С40 — блок управления синусоидальной нагрузкой; ФРП — фильтр радиопомех; МСН — модуль синусоидальной нагрузки; ПП-40 — повышающий преобразователь; КН-А40, КН-Е40 — комплексные нагрузки; ИН-40 — импульсная нагрузка; ФВых-40 — фильтр выходной; ФС-40 — фильтр сглаживающий; ВИ — ведомый инвертор; БКС — блок коммутации силовой; БУВИ — блок управления ведомым инвертором; БТр — блок трансформаторов; БП40 — блок питания; БУ40 — блок управления; БВент — блок вентиляторов

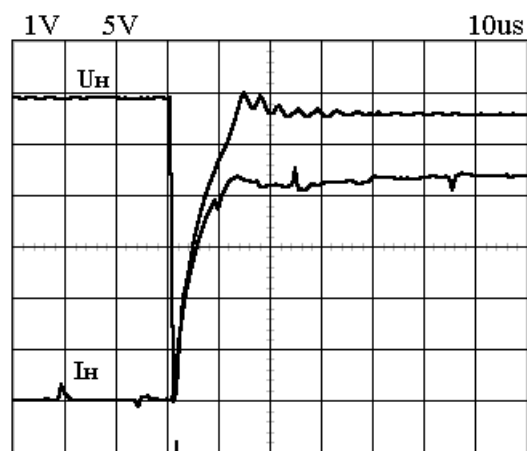


Рис. 9. Наброс тока 90 А

В устройстве БИН-40 предусмотрена возможность раздельной и независимой коммутации ши-

ны на четыре силовых выхода. Обеспечивается автономное или дистанционное (от ПЭВМ) подключение и отключение выходов.

Принцип действия основного канала БИН-40 аналогичен вышеописанному: осуществляется преобразование энергии постоянного тока входного источника в энергию переменного тока и передачи ее в питающую сеть. Входное напряжение 40 В через входные фильтры ФВх-40 поступает на фильтры радиопомех ФРП, с выхода которых подается на повышающие преобразователи ПП-40. С последовательно соединенных выходов десяти ПП-40 высокое постоянное напряжение через фильтры ФВых-40 и ФС-40 поступает на вход ведомого инвертора ВИ, где преобразуется, и через блок коммутации БКС возвращается в питающую сеть.

На рис. 9–14 представлены электронные осциллограммы токов и напряжений на входных шинах БИН-40 при различных видах нагрузки.

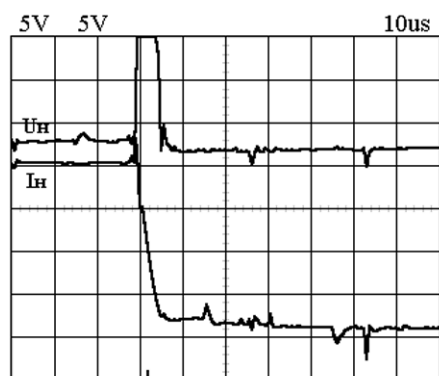


Рис. 10. Сброс тока 90 А

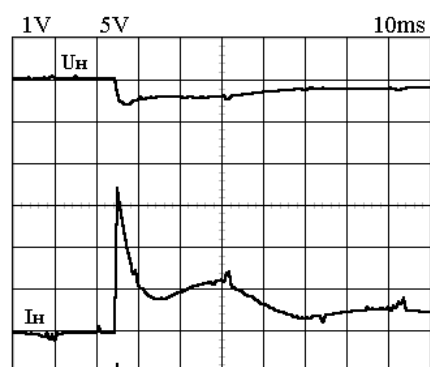


Рис. 11. Подключение комплексной нагрузки: 0,56 Ом, 13000 мкФ

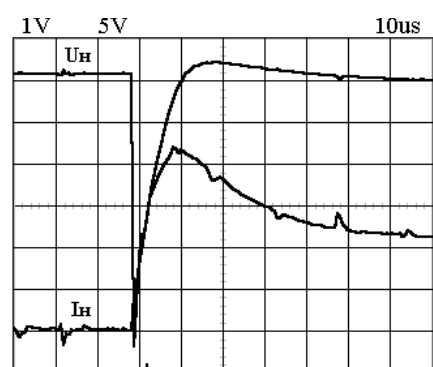


Рис. 12. Подключение комплексной нагрузки: 0,5 Ом, 43 мкФ

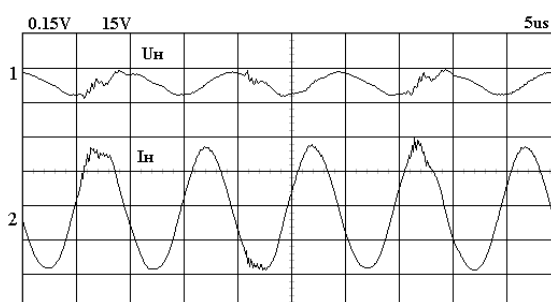


Рис. 13. Синусоидальная нагрузка, $I_n = 10$ А, $f = 100$ кГц

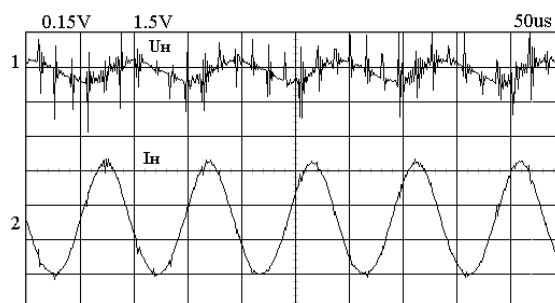


Рис. 14. Синусоидальная нагрузка, $I_n = 1$ А, $f = 10$ кГц

Разработка и создание нагрузочных устройств для испытаний СЭП КА является важной задачей. Ее решение и регулярная модернизация позволят обеспечить качественное проведение наземных испытаний бортовых электросистем. Важной особенностью в разработанном нагрузочном комплексе является вторичное использование электроэнергии СЭП, т.е. с последующей передачей в сеть, при этом алгоритмы формирования фронтов сброса-наброса нагрузки обеспечивают плавный переход от дифференцирующего ключа к повышающему преобразователю. Этот принцип позволит создавать эффективные нагрузочные устройства для более мощных СЭП КА. При формировании синусоидальной нагрузки следует обратить внимание на явление сильных электромагнитных помех в диапазоне малых сигналов 0...1 А. Полная автоматизация НУ позволяет задавать программу испытаний и вести протокол в автономном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Ислаев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. — Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1994. — 318 с.
2. Вопросы космической энергетики / Под ред. А.А. Куландина, С.В. Тимашева. — М.: Мир, 1971. — 349 с.
3. <http://www.nasa.gov>, <http://www.rosaviakosmos.ru>, <http://www.npopm.ru>.
4. Энергетические установки космических аппаратов / С.А. Подшивалов, Э.И. Иванов, Л.И. Муратов и др.; Под общ. ред. Д.Д. Неяровского и В.С. Викторова. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 223 с.
5. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебное пособие. — Изд. 2-е, испр. и доп. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 664 с.
6. Специальные электрические машины: (Источники и преобразователи энергии). Учебное пособие для вузов / А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин и др.; Под ред. А.И. Бертинова. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 552 с.